



УДК 622.691

**АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
ПЛОСКОЙ КОМПРЕССОРНОЙ РЕШЕТКИ****AERODYNAMIC OPTIMISATION OF
COMPRESSOR CASCADE**

Ледков Денис Евгеньевич, магистрант каф. «Турбины и Двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ledkov.d@gmail.com, Тел.: +7(922)023-00-03

Седунин Вячеслав Алексеевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Турбины и Двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: lerr@bk.ru. Тел.: +7(902)254-28-97

Ledkov Denis Evgenyevich, Master's student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ledkov.d@gmail.com, Ph.: +7(922)023-00-03

Sedunin Vycheslav Alekseevich, PhD., Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: lerr@bk.ru. Ph.: +7(902)254-28-97

Аннотация: В данной работе описаны методы оптимизации плоской компрессорной решетки с использованием методов вычислительной гидрогазодинамики. Описан процесс создания параметрической модели аэродинамического профиля. Приведено физическое обоснование оптимизированного профиля.

Abstract: In this paperwork, aerodynamic optimization methods of compressor cascade was described using the CFD approach. Also, the process of writing parametric model of airfoil was demonstrated. During this research, I investigate physical explanation of optimized airfoil to avoid optimization of a CFD code instead of airfoil.

Ключевые слова: вычислительная гидрогазодинамика; аэродинамический профиль; многопараметрическая оптимизация; решетка профилей.

Key words: computational fluid dynamic; airfoil; multiparametric optimization; compressor cascade.

ВВЕДЕНИЕ

При профилировании плоских решёток определяются и оптимизируются следующие параметры: потери полного давления, диапазон устойчивой и эффективной работы, обеспечение заданного угла поворота потока. Эти параметры ранее получались на основании результата продувок заранее сформированных, так называемых, семейств профилей, где для каждого набора входных параметров и требуемого угла поворота характеристики решётки находились на основании полученных корреляций. Начиная с середины 80-х годов широкое распространение получили методы оптимального профилирования Хоббса и Вейнгольда[], где каждый конкретный профиль получался не путём стандартного распределения толщины вдоль изогнутой средней линии (дуги окружности или параболы), а подбирался для обеспечения заданного распределения параметров. Такой подход в зависимости от параметров называется профили с контролируемой диффузорностью (CDA) или профили с контролируемым распределением скоростей (PVD). Несмотря на некоторые физические различия, суть метода получения

таких профилей сводится к решению локальной оптимизационной задачи по получению профиля с заданными аэродинамическими и механическими свойствами при минимизации потерь полного давления. Такой метод имеет преимущества перед полноценной трёхмерной оптимизацией, так как сборка лопаток в проточной части осуществляется из уже заранее оптимизированных плоских профилей. В 90-х целью работы Кёллера[] стала разработка автоматизированного пакета для проектирования профилей, включающая в себя геометрический код, CFD-решатель для 2D расчетов и оптимизационный алгоритм. Данный пакет позволил ему проектировать профили с оптимальными характеристиками под заданный диапазон углов атаки при разных числах Маха.

Продолжая концепцию методов проектирования, описанных в работах Хоббса, Вейнгольда и Кёллера, целью данной работы является разработка структуры оптимизации профилей с использованием более современных пакетов разработки. Данная структура должна включать в себя необходимые для этого блоки, такие как параметрическая модель профиля,

оптимизационный алгоритм, CFD- решатель, а также связующие звенья между данными с целью обмена данными.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОФИЛЯ

Параметрическая модель профиля позволяет изменять геометрию профиля через определенные переменные, что в свою очередь позволяет их использовать в качестве параметров оптимизации. На сегодняшний день самым распространённым способом параметризации является создание кривых Безье, описывающих контур аэродинамического профиля. На Рисунке 1 - Параметрическая модель профиля приведена используемая схема параметризации. Исходными данными являются радиусы входной и выходной кромок, две свободные управляющие точки для спинки, три свободные управляющие точки для корытца и углы входа и выхода по спинке и корытцу.

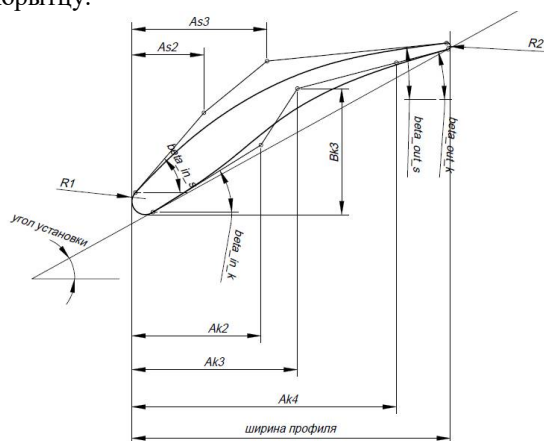


Рис. 1. Параметрическая модель профиля

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ

Оптимизационный алгоритм представляет собой математическую модель, призванную максимизировать или минимизировать целевую функцию, при этом не выходя за рамки заданных ограничений. Алгоритмы классифицируются как прямые, первого и второго порядка. Прямые алгоритмы используют прямую информацию об функции, в то время как для алгоритмов первого и второго порядков необходимо вычисление производных. Также существуют алгоритмы для нахождения локальных и глобальных минимумов.

Алгоритм: При выборе алгоритма я использовал только алгоритмы прямой оптимизации, ввиду невозможности взятия производных от функции. При выборе я провел исследование трех алгоритмов при решении задачи без ограничения по $Stax$ и углу поворота. По результатам которого я определил наилучший алгоритм. Критерием качества являлась гипотеза о том, что наименьшими потерями в этом случае будет пластина.

Целевая функция: При постановке оптимизационного решения необходимо грамотно подходить к выбору целевых функций и ограничений. В качестве целевой функции я выбрал потери полного давления при трех углах атаки- нулевом и при ‘+’ и ‘-’ 3 градуса. Формула 1-Потери полного давления; Формула 2 – Целевая функция f .

$$\omega = \frac{(P_1^* - P_2^*)}{P_1^*} \quad (1)$$

$$f = (\omega)_{i=-3} + (\omega)_{i=0} + (\omega)_{i=+3} \quad (2)$$

Ограничения: Основным ограничением являются прочностные характеристики профиля. Следовательно, необходимо наложить ограничения на максимальную толщину профиля, как основного параметра характеризующего прочность пера лопатки. Ограничение может находиться в диапазоне 2-10% процентов хорды в зависимости от расположения профиля в ступени компрессора. Также ограничением служило разворот потока, он должен быть не менее заданного уровня на расчетной точке.

CFD – БЛОК

Вычислительная гидродинамика является разделом механики сплошных сред, включающей в себя совокупность математических и численных методов решения течений жидкостей. На сегодняшний день существует множество коммерческих ПО для CFD. Однако также существует бесплатное открытое программное обеспечение с открытым доступом к исходным кодам. В своей работе я использовал программу Multall, написанную профессором Джоном Дентоном[. Важным этапом при использовании CFD является его верификация с экспериментом. В качестве экспериментальных данных я использовал продувки профилей А40 в ЦИАМ им. Баранова[. На рисунке 2- Верификация CFD представлено сравнение потерь полного давления на разных углах атаки при числе Маха равном 0,4. Максимальное расхождение при атаки 4 градуса в корытце составляет 37 %, отклонение в расчетной точке- 14,5%. Однако, наиболее важным является совпадение результатов при угле атаки 8 градусов в корытце, так как это режим является граничным и определяет предел работы профиля. Правильное предсказание предела является очень важным аспектом верификации.

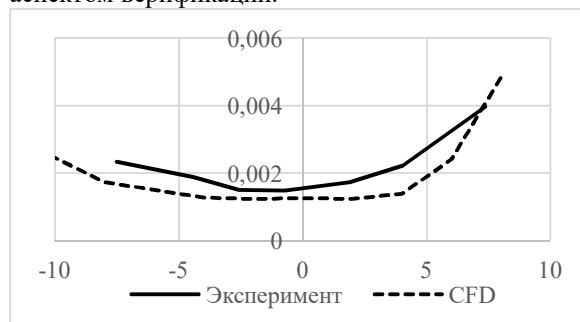


Рис. 2. Верификация CFD

АНАЛИЗ ОПТИМИЗАЦИИ

В результате оптимизации целевая функция снизилась на 25,76%. На Рисунке 3- Потери от угла атаки продемонстрированы результаты оптимизации на трех углах атаки, которые входили в целевую функцию. На рисунке 3 мы видим, что, несмотря на общее снижение потерь, при угле атаки -3 градуса произошло возрастание потерь на 5,84%. Тем не менее, на других режимах потери снизились на 33% и 45%.

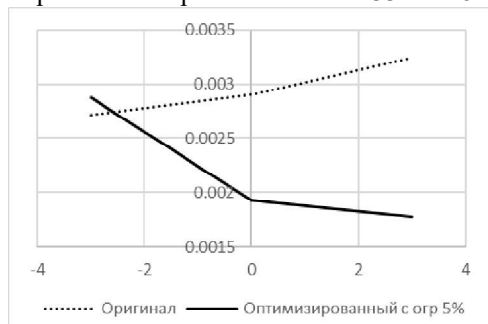


Рис. 3. Потери от угла атаки

На Рисунке 4 – Сравнение профилей представлены оптимизированный и исходный профили. Исходным являлся профиль из семейства A40, с углом изгиба 27.5 градусов и максимальной толщиной 5% от хорды. Следует отметить, что изгиб профиля сместился в сторону входной кромки, что говорит о том, что поворот потока обеспечен в более стабильной зоне. Это один из факторов, обеспечивающий снижение потерь на режимах нулевого и положительного углов атаки. Однако, минусом этого является некоторое повышение потерь на отрицательном угле атаки. Также следствием смещения изгиба на вход является снижение угла отставания потока. Среднее снижение составляет 2,6 градуса.

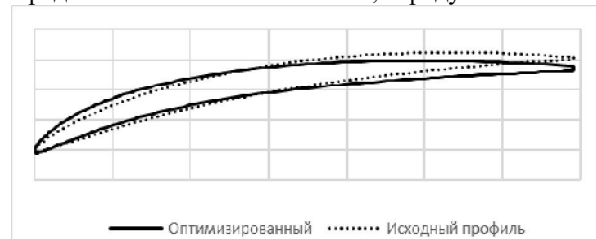
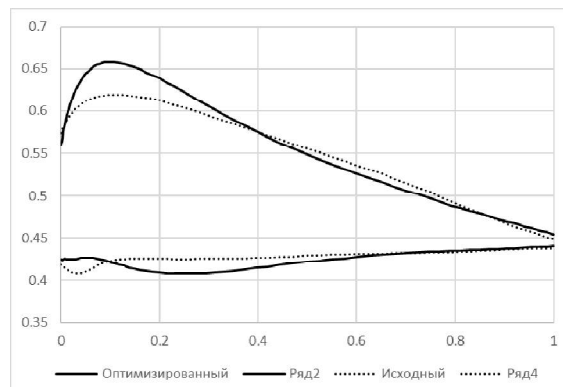


Рис. 4. Сравнение профилей

Также следует проанализировать распределение числа Маха по профилю. (Рисунок 5 – Распределение числа Маха при $i=0$). Из рисунка видно, что следствием смещения изгиба также стало большее ускорение потока на входе, но менее резкий градиент на выходе. Данное следствие можно объяснить тем, что максимально турбулизовав поток на входе, мы получаем более стабильное течение (так как турбулентный пограничный слой стабильнее), а как следствие меньшее нарастание пограничного слоя на выходе и как следствие меньшие потери полного давления. Подтверждения этому можно найти в работах Хоббса[1].

Рис. 5. Распределение числа Маха при $i=0$

ВЫВОД

Исследованы численные методы решения уравнения Навье-Стокса(CFD) и оптимизационные математические модели. Разработана параметрическая модель аэродинамического профиля. Получен оптимизированный профиль для числа Маха на входе 0,5 и максимальной толщины 5% от хорды. Установлены физические объяснения снижения потерь полного давления, а именно смещение изгиба профиля на вход, как следствие большая турбулизация на входе и меньшие углы отставания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) Блинов, В.Л. Разработка принципов параметрического профилирования плоских компрессорных решеток осевых компрессоров ГТУ на основании результатов многокритериальной оптимизации: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.04.12 / Блинов Виталий Леонидович. – Екатеринбург, 2015.
- 2) Дейч, М.Е. Газодинамика решеток турбомашин / М.Е. Дейч. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 528 с.
- 3) Markus Schnoes A Database of Optimal Airfoils for Axial Compressor Throughflow Design / Markus Schnoes and Eberhard Nicke // J. Turbomach 139(5), 051008 (Jan 24, 2017) (9 pages)
- 4) Hobbs, D.E. Development of Controlled Diffusion Airfoils for Multistage Compressor Application / Hobbs, D. E., and Weingold, H. D. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1984. – Vol. 106. – pp. 271-278.
- 5) Koller, U. Development of advanced compressor airfoils for heavy-duty gas turbines – Part I: Design and optimization / U. Koller, R. Monig, B. Kusters, H.A. Schreiber // Journal of Turbomachinery. Transactions of the ASME. – July 2000. – Vol. 122. – pp. 397-405.
- 6) Kusters, B. Development of advanced compressor airfoils for heavy-duty gas turbines – Part II: Experimental and theoretical analysis / B. Kusters, H.A. Schreiber, U. Koller, R. Monig // Journal of Turbomachinery. Transactions of the ASME. – July 2000. – Vol. 122. – pp. 406-41